

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторної роботи

«Вивчення кінетики процесу осадження (спливання)»
по курсу «Процеси та апарати хімічних виробництв»
для студентів хімічних спеціальностей усіх форм навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету
протокол № 2 от 25.06.2015 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2015

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Вивчення кінетики процесу осадження (спливання)» по курсу «Процеси та апарати хімічних виробництв» : для студентів хімічних спеціальностей всіх форм навчання / уклад.: Нечипоренко І. О., Биканов С. М., Горбунова О. В. та ін. – Харків : НТУ "ХПІ", 2015. – 20 с. – Укр. мовою.

Укладачі: І. О. Нечипоренко, С. М. Биканов, О. В. Горбунова, О. О. Гапонова, К. О. Горбунов, І. Б. Рябова.

Рецензент В. П. Шапорев

Кафедра інтегрованих технологій, процесів та апаратів

Вступ

Дисципліна "Процеси і апарати хімічних виробництв" є фундаментальною для хіміко-технологічної освіти.

Тут важливе місце займає цикл лабораторних робіт, які, у свою чергу, дозволяють студентам застосовувати теоретичні знання з практики, проводячи серію експериментів з подальшою їх обробкою.

При виконанні таких робіт можна шляхом експериментальних досліджень простежити якісні і кількісні характеристики загальних процесів і скласти уявлення про практичне застосування теоретичних закономірностей.

ВИВЧЕННЯ КІНЕТИКИ ОСАДЖЕННЯ (СПЛИВАННЯ)

Мета роботи – вивчення кінетики процесу осадження і зворотного йому процесу – спливання – на прикладі спливання крапель масла у воді.

Основні теоретичні відомості

Загальні положення

Осадження під дією сил тяжіння називають **відстоюванням**. Суть відстоювання полягає в тому, що неоднорідну суміш пропускають через ємкість, на дно якої під дією сили тяжіння осідають зважені частки. Спливання – процес, зворотний осадженню, і він підкоряється тим самим законам, що й осадження. Тому всі міркування, що стосуються осадження часток, застосовні і до спливання. У випадку, якщо щільність часток більше щільності середовища ($\rho_{\text{ч}} > \rho_{\text{с}}$), відбувається процес осадження, а якщо навпаки, $\rho_{\text{ч}} < \rho_{\text{с}}$, то відбувається спливання.

Якщо в процесі осадження (спливання) частка не взаємодіє з іншими частками і стінками апарату, такий процес називається **вільним осадженням (спливанням)**. Вільне осадження (спливання) може спостерігатися в суспензіях або емульсіях з дуже низьким вмістом дисперсної фази або в спеціально поставлених дослідах. У промислових умовах при розділенні неоднорідних систем має місце **обмежене осадження (спливання)** часток, тобто коли частки, що осідають, впливають на рух одне одного.

У реальних умовах при осадженні (спливанні) частки стикаються, труться один об одного і об стінки апарату. При цьому дрібніші частки гальмують рух більших, а більші – захоплюють за собою дрібні, прискорюючи їх рух.

...

*Швидкість осадження самотньої кулястої частки
під дією сил тяжіння (кінетика відстоювання)*

Розглянемо процес вільного осадження. Хай одиночна куляста частка діаметром d і щільністю $\rho_{\text{ч}}$ осідає під дією сил тяжіння в середовищі з щільністю $\rho_{\text{с}}$ (рис. 1).

Хай швидкість вільного осадження частки постійна і дорівнює $w_{\text{ос}}$. На осідаючу частку діють наступні сили:

– сила тяжіння (направлена вниз):

$$G_{\text{T}} = m_{\text{ч}} \cdot g = V_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot g = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot g$$

(з урахуванням того, що $\rho = m / V$);

– Архимедова або виштовхуюча сила (направлена вгору):

$$G_{\text{А}} = m_{\text{с}} \cdot g = V_{\text{с}} \cdot \rho_{\text{с}} \cdot g = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_{\text{с}} \cdot g ;$$

– сила тертя, або опір середовища (направлена вгору):

$$R = \zeta \cdot S \cdot \frac{w_{\text{ос}}^2 \rho_{\text{с}}}{2} = \zeta \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{w_{\text{ос}}^2 \rho_{\text{с}}}{2} ,$$

де $m_{\text{ч}}$, $m_{\text{с}}$ – маса частки і середовища, кг; $V_{\text{ч}}$, $V_{\text{с}}$ – об'єм частки і середовища, м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; d – діаметр осідаючої частки, м; S – площа проекції осідаючої частки на площу, перпендикулярну напрямку руху частки, м²; для кулястої частки

$$S = \frac{\pi d^2}{4} ;$$

ζ – коефіцієнт опору середовища, безрозмірний; $\rho_{\text{ч}}, \rho_{\text{с}}$ – щільність частки і середовища, кг/м^3 ; $w_{\text{ос}}$ – швидкість вільного осадження частки, м/с .

Наша частка осідає під дією різниці сил тяжіння і архімедівської сили:

$$G_{\text{T}} - G_{\text{A}} = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot g - \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_{\text{с}} \cdot g = \frac{\pi d^3}{6} \cdot g \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}).$$

Відзначимо, що якщо $\rho_{\text{ч}} > \rho_{\text{с}}$, то сила тяжіння більше архімедівської (що виштовхує) сили, і частка осідає. Якщо навпаки, $\rho_{\text{ч}} < \rho_{\text{с}}$, то сила тяжіння менше архімедівської (що виштовхує) сили і частка спливає.

Оскільки частка рухається рівномірно, то сила, що штовхає частку, дорівнює опору середовища:

$$\frac{\pi d^3}{6} \cdot g \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) = \zeta \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{w_{\text{ос}}^2 \rho_{\text{с}}}{2}.$$

Після скорочень отримаємо вираження для теоретичної швидкості вільного осадження (спливання) кулястої частки:

$$w_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{d(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})g}{\zeta \cdot \rho_{\text{с}}}}. \quad (1)$$

Повторимо, що якщо $\rho_{\text{ч}} > \rho_{\text{с}}$, то відбувається процес осадження, а якщо $\rho_{\text{ч}} < \rho_{\text{с}}$, то відбувається спливання. Тому у формулі (1) для осадження записують $(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})$, для спливання – $(\rho_{\text{с}} - \rho_{\text{ч}})$.

Вхідний у формулу (1) коефіцієнт опору середовища ζ залежить від режиму осадження частки. Режим осадження визначається по величині критерію Рейнольдса:

$$Re = \frac{w_{oc} \cdot d \cdot \rho_c}{\mu_c}, \quad (2)$$

где w_{oc} – швидкість вільного осадження (спливання) частки, м/с. d – діаметр осідаючої (спливаючої) частки, м; ρ_c – щільність середи, кг/м³; μ_c – динамічний коефіцієнт в'язкості середи (або в'язкість середи), Па·с.

Различают **ламинарный**, **переходный** и **турбулентный** режимы осаждения (всплытия) частиц. При ламинарном режиме слои жидкости плавно обтекают частицу, не образуя за ней завихрений. При турбулентном режиме плавность обтекания жидкостью твердой частицы нарушается, и за частицей образуются завихрения (вихри). Движение частиц становится неупорядоченным, траектория частиц – извилистой. Переходный режим характеризуется образованием незначительных завихрений за оседающей частицей.

Опытным путем установлено, что коэффициент сопротивления среды ζ имеет следующие значения:

1. При **ламинарном** режиме осаждения (всплытия) ($10^{-4} < Re < 2$):

$$\zeta = \frac{24}{Re}.$$

2. При **переходном** режиме ($2 < Re < 500$):

$$\zeta = \frac{18,5}{Re^{0,6}} \text{ (формула Аллена).}$$

3. При **турбулентном** режиме ($Re > 500$):

$$\zeta \approx 0,44.$$

Следует отметить, что в уравнении (1), по которому возможно определение w_{oc} , в правую часть входит ζ , который сам зависит от Re , а значит, и от скорости осаждения. Как быть?

Существует два пути решения.

Первый – это метод последовательных приближений. Его суть в следующем. Задаемся любым режимом осаждения, подставляем ζ для этого режима в формулу (1) и определяем скорость. Затем считаем Re и проверяем, попали мы в нужный режим или нет. Если попали, то расчет закончен. Если не попали, то берем другой режим осаждения.

Поскольку осаждение в промышленных отстойниках осуществляется в основном при ламинарном режиме, то:

$$\zeta = \frac{24}{Re} = \frac{24 \cdot \mu_c}{w_{oc} \cdot d \cdot \rho_c}. \quad (3)$$

Подставим (3) в (1):

$$w_{oc}^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{d \cdot (\rho_q - \rho_c) \cdot g \cdot w_{oc} \cdot d \cdot \rho_c}{\rho_c \cdot 24 \cdot \mu_c},$$

откуда

$$\boxed{w_{oc} = \frac{d^2 \cdot (\rho_q - \rho_c) \cdot g}{18 \cdot \mu_c}} - \text{формула Стокса.} \quad (4)$$

Формула Стокса пригодна только для ламинарного режима свободного осаждения.

Для газов это выражение упрощается:

$$\boxed{w_{oc} = \frac{d^2 \cdot \rho_q \cdot g}{18 \cdot \mu_c}},$$

так как можно пренебречь ρ_c , поскольку плотность газов примерно на три порядка меньше плотности жидкости.

Второй путь решения. Из выражения (2) выразим скорость осаждения:

$$w_{oc} = \frac{Re \cdot \mu_c}{d \cdot \rho_c}. \quad (5)$$

Подставим (5) в (1) и возведем в квадрат:

$$\frac{Re^2 \cdot \mu_c^2}{d^2 \cdot \rho_c^2} = \frac{4}{3} \cdot \frac{d \cdot (\rho_q - \rho_c) \cdot g}{\rho_c \cdot \zeta},$$

откуда

$$Re^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{d^3 \cdot (\rho_q - \rho_c) \cdot \rho_c \cdot g}{\mu_c^2} \cdot \frac{1}{\zeta},$$

или

$$\boxed{Re^2 = \frac{4}{3} \cdot Ar \cdot \frac{1}{\zeta}}, \quad (6)$$

где Ar – критерий Архимеда:

$$\boxed{Ar = \frac{d^3 \cdot (\rho_q - \rho_c) \cdot \rho_c \cdot g}{\mu_c^2}}. \quad (7)$$

В критерий Архимеда входят только физические величины среды и частиц, поэтому по его значению можно сразу же определить режим осаждения, а затем, получив соответствующее уравнение, рассчитать скорость.

Уравнение (6) является универсальным критериальным уравнением для осаждения (всплытия) частиц в поле действия силы тяжести.

Если в уравнение (6) подставить критические числа Рейнольдса и значения коэффициента сопротивления среды для соответствующих режимов осаждения (всплытия), то можно найти значения критических

чисел Архимеда. Например, для ламинарного режима критическое значение $Re = 2$, а коэффициент сопротивления $\zeta = \frac{24}{Re}$. Подставим в (6):

$$Re^2 = \frac{4}{3} \cdot Ar \cdot \frac{Re}{24};$$

$$2^2 = \frac{4}{3} \cdot Ar \cdot \frac{2}{24},$$

откуда

$$Ar = 36.$$

Аналогичным образом делается вывод для турбулентного режима. В результате получим критические значения Ar :

$$Ar < 36 \quad - \text{режим ламинарный};$$

$$36 < Ar < 83000 \quad - \text{переходный режим};$$

$$Ar > 83000 \quad - \text{турбулентный режим}.$$

Получим уравнения скорости свободного осаждения (всплытия) частиц для различных режимов. Для этого подставим в формулу (6) значения коэффициентов сопротивления среды для различных режимов осаждения (всплытия). С учетом выражений (2) и (7) получим следующее.

1. Ламинарный режим ($Re < 2$; $Ar < 364$; $\zeta = \frac{24}{Re}$):

$$Re^2 = \frac{4}{3} \cdot Ar \cdot \frac{Re}{24},$$

откуда критериальное уравнение для ламинарного режима:

$$\boxed{Re = 0,0556 \cdot Ar}. \quad (8)$$

Подставим выражения Re (2) и Ar (7) в уравнение (6):

$$\frac{w_{oc} \cdot d \cdot \rho_c}{\mu_c} = 0,0556 \frac{d^3 \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_c) \cdot \rho_c \cdot g}{\mu_c^2}.$$

После сокращений получим искомое выражение для теоретической скорости свободного осаждения (всплытия) при ламинарном режиме – уже известную формулу Стокса (4):

2. Переходный режим ($2 < Re < 500$; $36 < Ar < 83000$; $\zeta = \frac{18,5}{Re^{0,6}}$):

$$Re^2 = \frac{4}{3} \cdot Ar \cdot \frac{Re^{0,6}}{18,5},$$

откуда

$$\boxed{Re = 0,152 \cdot Ar^{0,714}}. \quad (9)$$

Если расписать Re и Ar с учетом (2) и (7), то получим скорость осаждения для переходного режима:

$$\boxed{w_{oc} = \frac{0,152 \cdot Ar^{0,714} \cdot \mu_c}{d \cdot \rho_c}}.$$

3. Турбулентный режим ($Re > 500$; $Ar > 83000$; $\zeta \approx 0,44$):

$$Re^2 = \frac{4}{3} \cdot Ar \cdot \frac{1}{0,44},$$

откуда

$$\boxed{\text{Re} = 1,741 \cdot \sqrt{\text{Ar}}} . \quad (10)$$

Если расписать Re и Ar с учетом (2) и (7), то получим скорость осаждения для турбулентного режима:

$$\boxed{w_{\text{ос}} = \frac{1,741 \cdot \sqrt{\text{Ar}} \cdot \mu_{\text{с}}}{d \cdot \rho_{\text{с}}}} .$$

Скорость действительного осаждения

Выше мы рассматривали теоретический процесс осаждения (всплытия) частицы, причем было оговорено, что частица имеет шарообразную форму. В действительности форма частиц отличается от шарообразной. Твердые частицы могут быть продолговатыми, угловатыми, пластинчатыми или вообще иметь неправильную форму. При всплытии жидких капель форма их тоже не шарообразная, так как капельки деформируются под действием сопротивления среды. Эти изменения формы влияют на скорость осаждения (всплытия).

Очевидно, что для частиц каждой формы необходим свой поправочный коэффициент, который учитывал бы изменение скорости, обусловленной отклонением формы частиц от шарообразной.

Ввиду многообразия форм частиц, для приближенных расчетов принято считать, что **действительная скорость осаждения (всплытия)** равна половине теоретической скорости свободного осаждения (всплытия), рассчитываемой по формулам (1) и (4):

$$w_{\text{ос.д}} = 0,5 \cdot w_{\text{ос}} . \quad (11)$$

Не следует путать понятие теоретической и действительной скорости осаждения (всплытия) с понятием свободного и стесненного оса-

ждения (всплытия). Понятие о процессах свободного и стесненного осаждения (всплытия) дано в начале методических указаний.

Описание лабораторной установки

Установка состоит из вертикального стеклянного цилиндра 1, заполненного водой. Внизу цилиндра вмонтированы три шприца 2, заполненные маслом. Сам цилиндр установлен на штативе 3. Шприцы имеют иголки различного диаметра, благодаря чему при выдавливании масла в воду образуются капельки различного диаметра (рис. 2). Плотность нашего масла меньше плотности воды, т. е. $\rho_{\text{ч}} < \rho_{\text{с}}$. Поэтому за счет разности плотностей капли масла будут двигаться вверх (всплывать).

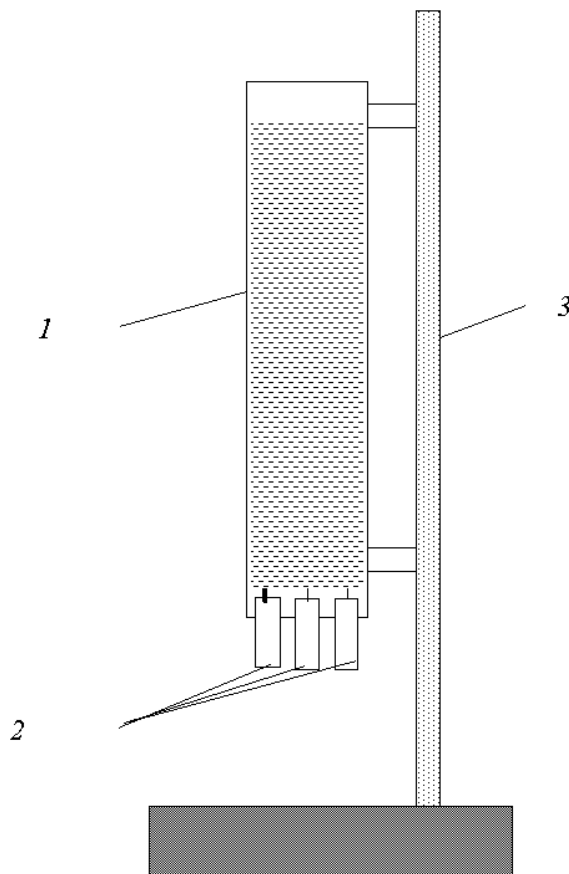


Рисунок 2

Методика выполнения работы

Суть работы состоит в измерении времени всплытия капелек масла, которые выдавливаются из шприца.

Необходимо осторожно (!) выдавить из шприца каплю масла. Как только капелька оторвется от иголки шприца, она начнет всплывать. Необходимо засечь время всплытия капли τ_i между метками на стеклянном цилиндре.

Следует сделать не менее трех опытов на каждом шприце.

В установку вмонтировано три шприца. Поскольку диаметр иглол шприцов разный, то капельки масла будут иметь разный диаметр. Значит и время всплытия будет различным.

Результаты опытов занести в табл. 1.

Таблица 1 – Измеренные величины

№ шприца	1	2	3
Время всплытия капли, $\tau_i, \text{с}$	$\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, \dots$	$\tau_{21}, \tau_{22}, \tau_{23}, \dots$	$\tau_{31}, \tau_{32}, \tau_{33}, \dots$
Среднее время всплытия, $\tau, \text{с}$	$\frac{\sum \tau}{n}$	$\frac{\sum \tau}{n}$	$\frac{\sum \tau}{n}$

Обработка экспериментальных данных

Еще раз подчеркнем, что всплытие – процесс, обратный осаждению, и он подчиняется тем же законам, что и осаждение. Поэтому все рассуждения, зависимости и формулы, полученные для осаждения частиц, применимы и к всплытию. Напомним, что если $\rho_{\text{ч}} > \rho_{\text{с}}$, то происходит процесс осаждения, а если $\rho_{\text{ч}} < \rho_{\text{с}}$, то происходит процесс всплытия. При этом в соответствующих формулах имеет место запись: для осаждения $(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})$, для всплытия $(\rho_{\text{с}} - \rho_{\text{ч}})$.

Поэтому:

1. Определяем среднее время всплытия капли τ для каждого шприца.
2. Определяем действительную скорость свободного всплытия капли:

$$w_{\text{ан.а}} = \frac{L}{\tau},$$

где L – расстояние между метками на стеклянном цилиндре (измерить);
 τ – среднее время всплытия капли масла, с.

Скорость всплытия будет называться свободной, а не стесненной, так как всплывает одиночная капля, не взаимодействуя с другими каплями (их нет) и со стенками стеклянного цилиндра.

3. Определяем теоретическую скорость свободного всплытия (осаждения) капли, которая для приближенных расчетов равна

$$w_{\text{вс}} = \frac{w_{\text{вс.д}}}{0,5}.$$

4. Определяем диаметр капли.

Диаметр капли определяется из критериальных уравнений (8–10) с подстановкой в них выражений (2) и (7) или из формул для скорости осаждения (всплытия). Все эти уравнения зависят от режима осаждения (всплытия). Определить режим осаждения (всплытия) мы не можем, так как в формулах для определения режима – критериев Re и Ar , фигурирует диаметр частиц (капли масла), который нам и надо найти.

Поэтому воспользуемся методом последовательных приближений. Повторимся, в чем его суть. Задаемся любым режимом всплытия (осаждения). Зная скорость всплытия, определяем диаметр капли. Затем проверяем режим всплытия (осаждения): попали мы в нужный режим или нет. Если попали, то расчет закончен. Если не попали, то берем другой режим всплытия (осаждения).

4.1. Задаемся ламинарным режимом всплытия (осаждения), поскольку в промышленных отстойниках в основном имеет место ламинарный режим.

А. Определим диаметр капли для ламинарного режима из критериального уравнения (8) или из формулы Стокса (4):

$$d = \sqrt{\frac{w_{\text{вс}} \cdot 18 \cdot \mu_{\text{с}}}{(\rho_{\text{с}} - \rho_{\text{ч}}) \cdot g}},$$

где $w_{\text{вс}}$ – теоретическая скорость свободного всплытия капли, м/с, определенная в пункте 3; $\rho_{\text{ч}}, \rho_{\text{с}}$ – плотность частицы (всплывающей капли, т. е. плотность масла), и среды (т. е. воды), кг/м³; $\rho_{\text{ч}} = 874 \text{ кг/м}^3$ – плотность масла; $\rho_{\text{с}}$ – (плотность воды) определим по справочнику, в зависимости от температуры воды (температуру воды измерим термометром); $\mu_{\text{с}}$ – вязкость среды, т. е. воды, Па·с, определим по справочнику, в зависимости от температуры воды; g – ускорение свободного падения, м/с².

Б. Определим величину критериев Рейнольдса и Архимеда:

$$\text{Re} = \frac{w_{\text{вс}} \cdot d \cdot \rho_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}};$$

$$\text{Ar} = \frac{d^3 \cdot (\rho_{\text{с}} - \rho_{\text{ч}}) \cdot \rho_{\text{с}} \cdot g}{\mu_{\text{с}}^2}.$$

В. Проверим режим всплытия (осаждения).

Если $\text{Re} < 2$ и $\text{Ar} < 36$, то режим ламинарный. Значит, мы попали в нужный режим. В этом случае расчет заканчиваем.

Если $\text{Re} > 2$ и $\text{Ar} > 36$, то режим не ламинарный. Значит, мы не попали в нужный режим. В таком случае задаемся следующим режимом всплытия (осаждения) – переходным – и продолжаем расчет.

4.2. Задаемся переходным режимом всплытия (осаждения) (если $\text{Re} > 2$ и $\text{Ar} > 36$).

А. Определим диаметр капли из критериального уравнения (9):

$$d = \frac{w_{\text{вс}}^{0,876} \cdot \rho_{\text{с}}^{0,251} \cdot \mu_{\text{с}}^{0,374}}{0,152^{0,876} \cdot (\rho_{\text{с}} - \rho_{\text{ч}})^{0,624} \cdot g^{0,624}}.$$

Б. Определим величину критериев Рейнольдса и Архимеда (по формулам п. 4.1 Б).

В. Проверим режим всплытия (осаждения).

Если $2 < \text{Re} < 500$ и $36 < \text{Ar} < 83000$, то режим переходный. Значит, мы попали в нужный режим. В этом случае расчет заканчиваем.

Если $\text{Re} > 500$ и $\text{Ar} > 83000$, то режим не переходный. Значит, мы не попали в нужный режим. В таком случае задаемся следующим режимом всплытия (осаждения) – турбулентным.

4.3. Задаемся турбулентным режимом всплытия (осаждения) (если $\text{Re} > 500$ и $\text{Ar} > 83000$).

А. Определим диаметр капли из критериального уравнения (10):

$$d = \frac{w_{\text{вс}}^2 \cdot \rho_{\text{с}}}{3,031 \cdot (\rho_{\text{с}} - \rho_{\text{ч}}) \cdot g}.$$

Б. Определим величину критериев Рейнольдса и Архимеда (по формулам п. 4.1 Б).

В. Проверим режим всплытия (осаждения).

Если $\text{Re} > 500$ и $\text{Ar} > 83000$, то режим турбулентный. Значит, мы попали в нужный режим. В этом случае расчет заканчиваем.

5. Результаты расчетов необходимо занести в табл. 2. По величине критериев Re и Ar определить режим всплытия (осаждения).

Построим графики зависимости $w_{\text{вс}} = f(d)$ и $\text{Re} = f(d)$. Проанализируем зависимость скорости всплытия от диаметра капли масла.

Таблица 2 – Результаты расчетов

№	Среднее время всплытия капли, τ , с	Действи- тельная скорость свободного всплытия капли, $w_{\text{вс.д}}$, м/с	Теоретиче- ская ско- рость сво- бодного всплытия капли, $w_{\text{вс}}$, м/с	Диаметр капли, d , м	Значение критерия Re	Значение критерия Ar	Режим всплытия
1							
2							
3							

Вопросы для самоконтроля

1. Классификация неоднородных систем.
2. Методы разделения неоднородных систем.
3. Свободное и стесненное осаждение (всплытие). Сущность процесса.
4. При каких условиях происходит осаждение, а при каких – всплытие?
5. Режимы осаждения (всплытия).
6. Коэффициент сопротивления среды ζ . Какие физические факторы он учитывает?
7. Вывод скорости свободного осаждения (всплытия) для одиночной шарообразной частицы.
8. Вывод основного универсального критериального уравнения для осаждения (всплытия) частиц в поле действия силы тяжести. Критерий Архимеда.
9. Вывод формулы Стокса для ламинарного режима осаждения (всплытия).
10. Соотношение между скоростью свободного и действительного осаждения (всплытия).
11. Суть метода последовательных приближений.
12. Методика выполнения работы и порядок расчетов.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторної роботи

«Вивчення кінетики процесу осадження (спливання)»

з курсу «Процеси та апарати хімічних виробництв»
для студентів хімічних спеціальностей усіх форм навчання

Російською мовою

Упорядники: НЕЧИПОРЕНКО Ігор Олександрович
БИКАНОВ Сергій Миколайович
ГОРБУНОВА Ольга Володимирівна
ГАПОНОВА Олена Олександрівна
ГОРБУНОВ Костянтин Олександрович
РЯБОВА Ірина Борисівна

Відповідальний за випуск проф. В.Є. Ведь

Роботу до друку рекомендувала проф. М.Г. Зінченко

Редактор Ю.І. Гуренко

План 2015 р., поз. 176

Підп. до друку 20.10.2015. Формат 60х84 1/16. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 1,2.
Наклад 100 прим. Зам. № Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП»
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ «ХП». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21